

## 风送转盘式生物农药离心雾化喷头的性能

朱正阳, 张慧春, 郑加强, 周宏平

(南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 针对专门喷施生物农药的器械较少的现状, 设计制造了风送离心式雾化装置, 并通过改变风送离心雾化转盘的结构参数(外径、齿数、斜角)以及操作参数(流量、转速、风速)进行雾滴粒径、生物农药活性以及小菜蛾 *Plutella xylostella* 防治药效试验。得出的主要结论有: 转盘外径越大, 雾滴粒径越小; 斜角度数越大, 雾化粒径越小; 齿数越多, 雾滴粒径越小。由此推荐了针对不同环境下的作物, 风送转盘式生物农药离心雾化喷头的最佳结构参数组合, 转盘外径、转盘斜角、转盘齿数对于生物农药活性的影响都不大, 满足病虫害防治要求。综合各因素, 提出了风送转盘式生物农药离心雾化喷头操作参数的优化设置为: 流量为  $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , 转速为  $6\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 风速为  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 从药效上看, 各种结构参数和操作参数组合小菜蛾的死亡率都在 90% 以上, 满足使用要求。图 6 表 3 参 8

**关键词:** 农业机械; 林业机械; 生物农药; 转盘; 离心雾化; 小菜蛾

中图分类号: S491; S776.28

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)02-0361-06

## Performance of an air-assisted spinning disc nozzle for biological pesticide

ZHU Zhengyang, ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** To improve the situation that there is few special equipment for biological pesticide spraying, the air assisted centrifugal atomization device has been designed and manufactured. By changing the structural parameters (diameter, number of teeth, bevel) and operating parameters (flow rate, rotational speed and wind speed), this research conducted experiments on the particle diameter, biological pesticide activity and efficacy trials. The main findings are as follows: The bigger atomization wheel diameter is the smaller atomized particle size will be; the smaller the angle degree is the greater atomized particle size will be; the larger number of teeth is the smaller atomized particle diameter will be. As a result, the best combinations of disc nozzle structural parameters have been recommended for various environments. Another conclusion is that the wheel diameter, the turntable angle, and number of teeth have little influence on biological pesticide activity, thus meeting the requirement of plant pest prevention and control. The optimal combination of operational parameters are as follows: The flow rate is  $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ; the speed is  $6\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  and the wind speed is  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . From the perspective of pesticide efficacy, *Plutella xylostella* mortality rate is over 90%, which meets the use requirements. [Ch, 6 fig. 3 tab. 8 ref.]

**Key words:** agricultural machinery; forestry machinery; biological pesticide; spinning disk; centrifugal atomization; *Plutella xylostella*

病虫害防治一直是农林业不断探索解决的重要问题。目前占主流地位的病虫害防治方法是化学

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31371963); “十二五”国家科技计划项目(2014BAD08B04); 江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20130965); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏省杰出青年教师培育专项(2012256); 江苏省青蓝工程人才工程项目

作者简介: 朱正阳, 从事植物保护机械研究。E-mail: 166392274@qq.com。通信作者: 张慧春, 教授, 博士, 从事智能植物保护机械和精确林业模拟模型技术研究。E-mail: njzhanghc@njfu.edu.cn

防治。然而,实际生产中因为害虫抗药性的提高,防治效果下降,继而相应的化学农药的开发难度和开发成本却越来越高。再者,大量的农药残留导致的食品安全问题日益突出,每年仅因蔬菜农药残留超标导致的中毒事故就达10万人次,造成外贸损失高达70亿美元<sup>[1]</sup>。同时化学农药对非靶标生物的杀灭和毒害作用严重影响了自然生态平衡和生态系统的自我调节能力。这些都使得研究人员和生产企业开始把注意力转向低毒、低残留、不易产生抗药性的生物农药的开发与使用。现有的农药喷洒装备大都为喷洒化学农药的机械,专门喷施生物农药的器械较少。和化学农药不同,生物农药的喷洒关键在于喷洒后生物农药的活性。由于生物农药的杀虫作用与细菌数量和活性相关,此外,其活性还和生物农药的成分配比、喷施器械的结构以及喷施的技术参数有关<sup>[2-3]</sup>,所以生物农药喷洒器械的研究和化学农药喷洒器械的研究不同,它除了要考虑雾滴粒径、覆盖率、均匀性等雾化性能问题,还要考虑到生物农药的活性保持问题。生物农药喷洒器械的结构参数和操作参数影响雾化程度以及生物农药活性的保持。然而,雾化程度的正确选用以及生物农药活性的保持有助于提高药液的使用效率,减少对环境的污染<sup>[4-5]</sup>。雾滴粒径越大,沉降到靶标的速度就越快,单个雾滴所具有的动能也越大,不易随风飘移,但大雾滴撞击到靶标上的附着能力差,极易发生弹跳和滚落流失,造成大量农药损失且污染了环境;小雾滴对靶标的覆盖密度和均匀度远优于大雾滴,并且附着能力强、穿透性能好,能够沉积到大雾滴不易沉积到的植株背面,但小雾滴易蒸发飘移;生物农药的活性越高越有利于目标病虫害的防治。本研究设计了风送转盘式生物农药离心雾化系统,通过改变离心雾化转盘的结构参数(外径、齿数、斜角)以及操作参数(流量、转速、风速)进行雾滴粒径、生物农药活性以及防治药效试验,为确定专门喷施生物农药的风送转盘式离心雾化机构提供科学依据。

## 1 材料与方方法

### 1.1 理论及参数介绍

1.1.1 转盘式离心雾化原理 转盘式离心雾化喷头工作时(图1),液体自转盘内径的边沿处注入。当盘的转速和进液量都很低时,液体的黏度和表面张力的影响是主要的,雾滴单独形成从盘边缘甩出。当盘的圆周速度和进液量均高时,液滴被拉成许多液丝,液量增加,液丝数目也增加到一个峰值,液丝数不再增加但液丝变粗,液丝极不稳定,距离转盘不远处就迅速断裂,形成无数小液滴。当液体流量继续增加时,液丝数量与丝径均不再增加,液丝间相互并成薄膜,抛出的液膜离圆盘周边一定距离后,被分裂成分布较广的液滴。若将圆盘转速提高,液膜便向圆盘周边收缩。若液体在圆盘表面上的滑动能减到最小,则可使液体以高速度喷出,在圆盘周边与空气发生摩擦而分裂雾化。

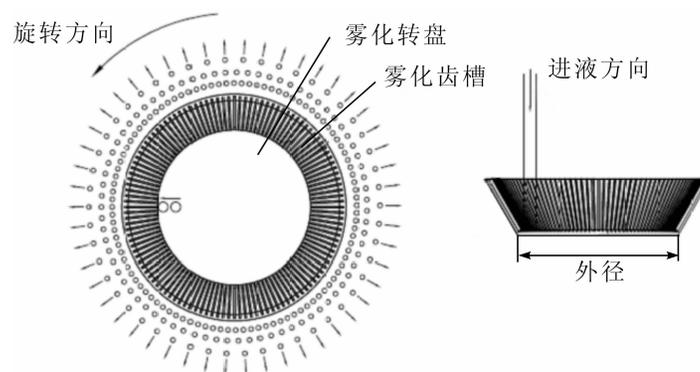


图1 转盘式离心雾化喷头工作原理图

Figure 1 Working principle diagram of disc centrifugal atomizing nozzle

1.1.2 风送转盘式离心雾化原理 单纯通过雾化转盘自身离心力输送雾滴情况下,其雾化性能不是很理想,液体雾化后仅能输送较短的距离、辐射较小的范围,而且飘移比较严重。所以增加风送机构,提高输送距离,提高穿透性能是必不可少的。风送转盘式离心雾化机构工作时,液体从离心雾化转盘甩出后遇到轴流风机产生的气流,液滴朝着气流的方向扩散,从而达到目标靶位。由于空气流速的变化,使得液滴与空气间的摩擦更剧烈,所以风送转盘式离心雾化能获得更小的雾滴粒径。

1.1.3 离心雾化转盘操作参数和结构参数 影响转盘雾化性能的因素可分为操作参数和结构参数。操作参数是指转盘的转速、进液的流量和风机的风速，结构参数是指转盘的外径、斜角(转盘侧壁与水平面的夹角)和齿数(转盘内壁起引流作用的齿槽数量)。转盘的结构参数<sup>[6]</sup>如图 1 所示，转盘最大直径称为外径，转盘的外壁和水平面的夹角称为斜角，内壁起引流作用的凹槽称为齿槽(齿槽端面为矩形)。本研究尺槽的深度全部选用 1 mm)。

## 1.2 试验设计

1.2.1 雾化转盘的加工 本研究采用 3D 打印的方式加工了 3 组共 7 个转盘(精度为 0.04~0.10 mm)。材料选用耐腐蚀且质量较轻的工程塑料(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物, ABS)。加工的第 1 组雾化转盘齿数均为 120 个,斜角均为 60°,外径分别为 80, 100, 120 mm(图 2)。第 2 组齿数均为 120 个,外径均为 100 mm,斜角分别为 45°, 60°, 75°(图 3)。第 3 组斜角均为 75°,外径均为 100 mm,齿数分别为 90, 120 和 150 个(图 4)。

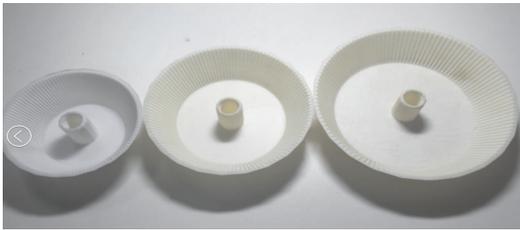


图 2 不同外径(80, 100, 120 mm)的 3 个雾化转盘

Figure 2 Three types of different diameter atomization turntable (80 mm, 100 mm and 120 mm)



图 3 不同斜角(45°, 60°, 75°)的 3 个雾化转盘

Figure 3 Three types of different bevel atomization turntable (45°, 60°, 75°)

1.2.2 试验系统的设计 如图 5 所示,试验系统包括离心雾化转盘、轴流风机、激光粒度仪、激光粒度仪和生物农药活性收集装置。整套系统保证了生物农药活性检测药液的收集,药效检测药液的收集,以及雾滴粒径的测试同时性完成。风送离心式雾化装置的结构如图 6 所示:它包括了轴流风机、离心雾化系统、导流罩、固定罩、U 形轴、和进液系统。

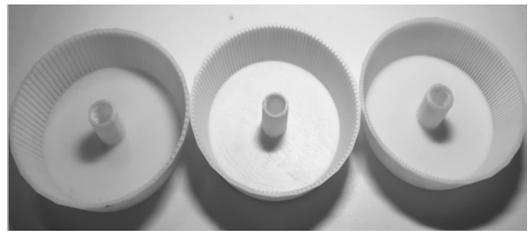


图 4 不同齿数(90, 120, 150 个)的 3 个雾化转盘

Figure 4 Three types of different number of atomization turntable (90, 120, 150)

## 1.3 试验方法

用记号笔将各因素水平分成不同的组(共 16 组)分别标记在培养皿底部背面上;将标有参数的培养皿一组一组放入收集装置内,闭合挡板;打开风送离心雾化装置并调整到相应的参数;待各参数值稳定后拉开挡板收集 10 s(10 s 足以收集到 1 mL 的原液,方便下一步的摇床培养),同时用激光粒度仪测量其雾滴粒径大小。

本试验的生物农药活性试验和药效试验是同时进行的。标有相同因素水平的小菜蛾 *Plutella xylostella* 培养皿和生物农药活性收集培养皿同时放入生物农药活性收集装置中。因为生物农药的药效不仅和喷洒装置有关,还和生物农药的配置有关,本试验为了试验喷洒装置的药效,所以务必保证使用的是同一批配制的生物农药。

## 1.4 评价方法

1.4.1 雾滴粒径评价方法 试验评价喷头雾化性能参数为:雾滴体积累计分布为 10%的雾滴直径 DV10,雾滴体积累计分布为 50%的雾滴直径 DV50,也称为体积中径(volume median diameter,简称 VMD)。通过德国新帕泰克有限公司的 HELOS/VARIO-KR 型号的激光粒度仪及 WINDOX5 软件对雾滴粒径进行测量和数据处理,粒径的测试范围为 0.1~3 500.0 μm,满足本试验的要求。

1.4.2 生物农药活性评价方法 白僵菌 *Beauveria* 在森林害虫和农业害虫的应用极为广泛,对森林中松毛虫 *Dendrolimus*,松叶蜂 Diprionidae 和褐天牛 *Nadezhdiella cantori* 与农林作物中常见的蝉类害虫

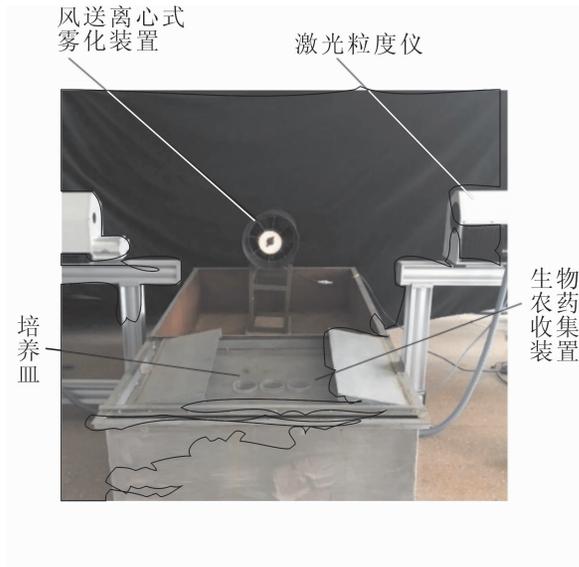


图5 试验系统图

Figure 5 Test system diagram

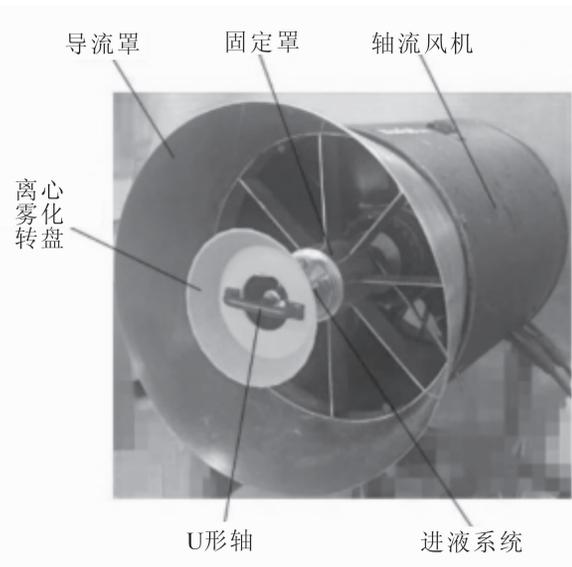


图6 风送转盘式离心雾化装置结构图

Figure 6 Structure of air-assisted spinning disc nozzle

(ticks and mites)具有较强的防治效果。本试验选用白僵菌作为生物农药，白僵菌的活性用白僵菌孢子的萌发率来衡量。孢子萌发率是指在观察的1个视野中萌发的孢子与总孢子数的比值，具体的测量方法：取由风送离心雾化装置所喷施的白僵菌制剂试样(本试验白僵菌孢子粉来源于湖北省林科院)1 mL放在25 mL的麦芽浸粉培养液(麦芽浸粉2%，用蒸馏水配置)中，配制成悬浮液，镜检稀释至有孢子20~30个·视野<sup>-1</sup>。放置于120 r·min<sup>-1</sup>的摇床(产地：Switzerland，型号：Multitron)在25℃条件下培养12 h，取样制片镜检。用血球板数板计数，芽管大于孢子外径的孢子记为萌发孢子。

1.4.3 喷施药效的评价方法 选用3~4龄小菜蛾作为目标害虫来检测风送离心雾化装置的药效<sup>[7-8]</sup>。将小菜蛾10只1组放入培养皿中并在培养皿中放入饲料，使用前文设计制造的风送转盘式离心雾化装置喷施白僵菌，48 h后数其死亡个数。本次试验设有不喷施生物农药的对照组。最后以施药组与对照组的比值来确定该试验组的药效。由于田间作业情况复杂，此为实验室内药效的评价方式。

## 2 结果与分析

### 2.1 转盘结构参数对雾滴粒径的影响

雾滴粒径是衡量喷头雾化性能的重要指标，是农药喷雾技术最为重要和最易控制的因素。转盘的结构参数对于雾滴粒径是有影响的，本次试验用白僵菌药液，在转速6 000 r·min<sup>-1</sup>，进液流量20 mL·h<sup>-1</sup>，风速5 m·s<sup>-1</sup>的参数下，测得不同结构参数的转盘喷施的雾滴粒径(实验数据为重复3次后的平均值)。数据如表1所示。

表1 不同转盘结构下白僵菌的雾滴粒径

Table 1 Particle diameter in different structures of turntable

转盘外径/mm	雾滴粒径/ $\mu\text{m}$	转盘斜角/ $^\circ$	雾滴粒径/ $\mu\text{m}$	转盘结构齿数/个	雾滴粒径/ $\mu\text{m}$
80	99.72	45	86.61	90	96.51
100	86.16	60	89.16	120	95.69
120	81.73	75	95.69	150	87.65

由表1可以看出：雾化转盘外径从80 mm增大到120 mm时，雾滴粒径从99.72  $\mu\text{m}$ 减小到81.73  $\mu\text{m}$ ，可见随着雾化转盘外径的增大，雾滴粒径逐渐减小；转盘斜角从45°增大到75°，雾滴粒径由86.61  $\mu\text{m}$ 逐渐增大至95.51  $\mu\text{m}$ ，可见雾滴粒径随着转盘斜角的增大而增大；转盘齿数由90个增加至150个时，雾滴粒径由96.51  $\mu\text{m}$ 减少到87.65  $\mu\text{m}$ ，可见转盘齿数越多，雾滴粒径越小。这是因为，外径越大，离心力越大，雾滴在离开转盘的初速度越高，甩出后的粒径越小；而转盘斜角越大，雾滴在盘内壁的流动距离越长，雾滴在离开转盘的初速度越高，甩出后的粒径越小；转盘齿数越多，单位齿距内

液丝的直径越小，从而甩出后粒径越小。

## 2.2 转盘结构参数对生物农药活性以及药效的影响

记经过转盘雾化的白僵菌孢子萌发率为  $A_1$ ，未经转盘雾化的白僵菌孢子(对照组)萌发率为  $A_2$ 。在流量为  $20 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ，风速为  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，转速  $6\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，喷施距离为  $0.5 \text{ m}$  的条件下，不同外径的雾化转盘生物农药活性试验数据如表 2。

表 2 不同转盘结构下的活性及药效数据表

Table 2 Activity and efficacy data in different structures of turntable

转盘外径/mm	$(A_1/A_2)/\%$	$T/\text{头}$	转盘斜角/ $^\circ$	$(A_1/A_2)/\%$	$T/\text{头}$	转盘齿数/个	$(A_1/A_2)/\%$	$T/\text{头}$
80	94.99	10	45	98.96	9	90	90.09	10
100	89.56	10	60	89.56	10	120	88.51	9
120	97.51	9	75	88.51	9	150	97.05	10

说明： $A_1/A_2$ 表示因素对生物农药活性的影响， $T$ 表示 1 个采样组中 10 头小菜蛾死亡的头数。为了减少误差，本研究的所有数据都是取样 3 次后的平均值

由表 2 可看出：3 种外径转盘下生物农药活性衡量值  $A_1/A_2$  分别为 94.99%，89.56% 和 97.51%，平均值为 94.02%，最低值为 89.56%，表明使用不同外径的转盘都能获得较高活性；3 种斜角下活性分别为 98.96%，89.56% 和 88.51%，转盘斜角对于活性的影响为负相关，表明转盘斜角越大，生物农药的相对活性越低；3 种齿数下  $A_1/A_2$  分别为 90.09%，88.51% 和 97.05%，平均值为 91.88%，最低值为 88.51%，表明使用不同齿数的转盘都能获得较高活性。就整体活性而言，活性最低为 88.51%，说明即使转盘结构参数对生物农药活性有影响，但其相对活性的绝对数值高，满足使用要求。

在药效方面，经过不同结构参数的雾化转盘喷施后的生物农药对于小菜蛾的致死率都在 90% 以上，满足使用要求。

## 2.3 操作参数对于生物农药活性以及药效的影响

用外径为  $120 \text{ mm}$ ，斜角为  $60^\circ$ ，齿数为 120 个的转盘，改变其操作参数进行正交试验，结果如表 3 所示。

表 3 操作参数对于生物农药活性影响的正交试验表

Table 3 Effect of operation parameters for the activity of biological pesticide orthogonal test table

试验号	流量/ $(\text{L}\cdot\text{h}^{-1})$	转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(A_1/A_2)/\%$	小菜蛾死亡数/头
1	20	3 000	5	97	9
2	20	4 500	7	108	10
3	20	6 000	9	63	9
4	40	3 000	7	61	9
5	40	4 500	9	80	10
6	40	6 000	5	134	10
7	60	3 000	9	80	10
8	60	4 500	5	65	10
9	60	6 000	7	97	10
$k_1/\%$	89	79	103		
$k_2/\%$	92	85	89		
$k_3/\%$	81	99	74		
$R$	0.10	0.19	0.29		

说明： $k_1$ ， $k_2$ ， $k_3$ 表示与参照组(ck 组)比值的均值， $R$ 表示极差

通过极差的大小对比，得到影响生物农药活性大小的操作参数因素次序为风速 > 转速 > 流量。从生物农药活性上看，本试验希望寻找到对于生物农药活性的影响最小也就是平均萌发率与对照组的比值最高的操作参数组合。从表 3 可知：流量列对应的均值试验 2 最大，转速列对应的均值试验 3 最大，风速列对应的均值试验 1 最大。所以，为了获得最佳的操作参数组合，结合本试验结果，流量为  $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ，转速为  $6\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，风速为  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  对生物农药活性的影响最小。

在药效方面, 无论何种操作参数组合小菜蛾的死亡率都在 90% 以上, 满足使用要求。

### 3 结论

本研究设计了风送转盘式生物农药离心喷雾系统, 通过改变离心雾化转盘的结构参数(外径、齿数、斜角)以及操作参数(流量、转速、风速)进行雾滴粒径、生物农药活性以及药效试验。得到如下结论: ①转盘外径、斜角度数、齿数多少都与雾滴粒径负相关。对于低矮、密集植物(如灌木、设施园艺植物等)的病虫害防治, 由于小粒径药液对靶标的覆盖密度和均匀度远优于大粒径药液, 并且附着能力强、穿透性能好, 能够沉积到大粒径药液不易沉积到的植株背面。为获得较小粒径的药液推荐选用大外径(120 mm), 大斜角(75°), 多齿数(150 个)的转盘进行作业; 对于高大、稀疏植物(如行道树等)的病虫害防治, 由于大粒径药液沉降到靶标的速度快, 不易随风飘移, 为获得较大粒径的药液推荐选用小外径(80 mm), 小斜角(45°), 少齿数(90 个)的转盘进行作业。②转盘结构参数(外径、斜角、齿数)对于生物农药活性的影响都不大。就整体活性而言, 最高为 98.96%, 最低为 88.51%, 均值为 92.74%, 说明用转盘作为喷施生物农药的器械能够满足病虫害防治要求。操作参数选用流量为 40 L·h<sup>-1</sup>, 转速为 6 000 r·min<sup>-1</sup>, 风速为 5 m·s<sup>-1</sup> 的组合对生物农药活性的影响最小。③从药效上看, 各种结构参数和操作参数组合喷施后的生物农药对于小菜蛾的致死率都在 90% 以上, 满足使用要求。④综合雾滴粒径、生物农药活性和小菜蛾的防治效果, 得到雾化转盘的结构参数和操作参数: 对于低矮、密集植物, 转盘以外径 120 mm, 斜角 75°, 齿数 150 个; 操作参数以流量 40 L·h<sup>-1</sup>, 转速 6 000 r·min<sup>-1</sup>, 风速 5 m·s<sup>-1</sup> 为最优。对于高大、稀疏植物, 转盘外径 80 mm, 斜角 45°, 齿数 90 个; 操作参数以流量 40 L·h<sup>-1</sup>, 转速 6 000 r·min<sup>-1</sup>, 风速 5 m·s<sup>-1</sup> 为最优。

### 4 参考文献

- [1] 叶建仁. 中国森林病虫害防治现状与展望[J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(6): 1 - 5.  
YE Jianren. Current status and perspective on forest pests control in China [J]. *J Nanjing For Univ*, 2000, 24(6): 1 - 5.
- [2] 张慧春, 周宏平, 郑加强, 等. 喷头雾化性能及雾滴沉积可视化模型研究[J]. 林业工程学报, 2016, 1(3): 91 - 96.  
ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. A study of spary nozzle atomization performance and droplet deposition visual mode [J]. *J For Eng*, 2016, 1(3): 91 - 96.
- [3] 张慧春, 郑加强, 周宏平, 等. 转笼式生物农药雾化喷头的性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 63 - 70.  
ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Performance experiments of rotary cage atomizer for biological pesticide application [J]. *Transac Chin Soc Agric Eng*, 2013, 29(4): 63 - 70.
- [4] HOFFMANN W C. Technical note: comparison of three imaging systems for water-sensitive papers [J]. *Appl Eng Agric*, 2005, 21(6): 961 - 964.
- [5] BAYAT A, BOZDOGAN N Y. An air-assisted spinning disc nozzle and its performance on spray deposition and reduction of drift potential [J]. *Crop Prot*, 2005, 24(11): 951 - 960.
- [6] 祁力钧, 傅泽田, 高振江. 转子喷头的雾滴轨迹及雾滴飘移性能[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(2): 47 - 52.  
QI Lijun, FU Zetian, GAO Zhenjiang. Spray pattern and drift potential of a spinning disk [J]. *J China Agric Univ*, 2002, 7(2): 47 - 52.
- [7] FOX R D, DERKSEN R C, ZHU Heping, et al. A history of air-blast sprayer development and future prospects [J]. *Transac ASABE*, 2008, 51(2): 405 - 410.
- [8] 李锐, 李生才. 生物农药及其发展对策[J]. 山西农业科学, 2008, 36(7): 74 - 76.  
LI Rui, LI Shengcai. Biopesticide and its developmental measure [J]. *J Shanxi Agric Sci*, 2008, 36(7): 74 - 76.